

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ ТУРБИН ГТД

Кувалдин А.Б.¹, Лепешкин А.Р.², Лепешкин С.А.¹

¹ Научно-исследовательский университет – Московский энергетический институт, Москва, Россия, kuvaldinab@mpei.ru

² Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия, lepeshkin.ar@gmail.com

Аннотация — Разработаны конечно-элементные трехмерные модели для расчета электромагнитных и температурных полей и параметров индукторов при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS. Рассмотрены особенности математического моделирования индукционного нагрева вращающихся дисков турбин ГТД. Проведены исследования характеристик стержневых индукторов с учетом влияния зазора и частоты тока. Получен новый эффект при индукционном нагреве дисков, заключающийся в дополнительном выделении тепловой энергии в изделии за счет вращения. Проанализировано влияние частоты вращения на формирование мощности внутренних источников тепла во вращающемся диске с использованием стержневых и эллипсных индукторов.

Ключевые слова — индукционный нагрев, диск, математическое моделирование, индуктор, частота вращения, внутренние источники тепла.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из областей применения индукционного нагрева является реализация тепловых процессов в телах вращения для проведения разгонных и термоциклических испытаний дисков и бандажей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и турбин энергетических установок на разгонных и специализированных стендах [1-8]. Индукционный нагрев позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и получить заданное неравномерное распределение температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям при испытаниях на разгонных стендах [1-8]. Обычная система индукционного нагрева состоит из нескольких плоских кольцевых индукторов, расположенных на разных радиусах диска. Ее недостатками являются: невозможность получения дополнительной тепловой энергии за счет вращения (т.к. индукторы осесимметричны), дискретное расположение индукторов по поверхности диска ухудшает точность воспроизведения температурных полей изделий. Ранее использовались, в основном, аналитические методы и одно- или двухмерные численные методы расчета, а также физическое моделирование или натурные эксперименты по разработке индукторов. Указанные методы не позволяют учесть сложную геометрию

системы индукционного нагрева, влияния вращения на распределение температуры и выделение мощности внутренних источников тепла в диске и требуют введения многих допущений, снижающих точность расчетов. Натурные эксперименты по нагреву вращающихся дисков на установках связаны с существенными материальными затратами и ограничивались по времени исследований.

При вращении деталей в магнитном поле в них наводится ЭДС и, таким образом, появляется дополнительная мощность внутренних источников тепла при определенных условиях в зависимости от формы индукторов. Однако, ранее при расчетах систем индукционного нагрева вращающихся дисков, в том числе, и на разгонных стендах вклад этого эффекта в нагрев не рассматривался и не оценивался.

Разработка расчетно-экспериментальной методики индукционного нагрева, основанной на 3D-моделях, с учетом нового эффекта - получения дополнительной тепловой энергии в дисках за счет вращения (дополнительного выделения мощности внутренних источников тепла) и обеспечения заданного температурного поля дисков является актуальной задачей. При термоциклических испытаниях максимальная частота вращения дисков может составлять 20000 - 70000 об/мин.

ТЕОРИЯ

Разрабатывается методика расчета режимов индукционного нагрева, трехмерные математические модели в программном комплексе ANSYS для расчета электромагнитных полей с учетом выделения дополнительной мощности внутренних источников тепла в дисках и моделирования распределения температуры по диску с учетом вращения. Минимальные частоты вращения определяются, при которых температура на любом радиусе диска была бы равномерной в окружном направлении при моделировании неравномерного распределения температуры диска в радиальном направлении.

Исследования влияния частоты вращения на выделение мощности внутренних источников тепла в диске за счет двух составляющих ЭДС проводятся с

использованием стержневых и плоских индукторов. Первая составляющая возникает на средней частоте тока в не вращающемся диске. Вторая составляющая ЭДС наводится при вращении диска в электромагнитном поле, создаваемом индуктором, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. В результате чего дополнительно возникают индуцированные токи. На небольшой частоте вращения указанная составляющая мала. При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения (пульсации) магнитного потока в диске и наведенная ЭДС (вторая составляющая) становится значимой в диапазоне больших частот вращения. В результате мощность дополнительных внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска.

Таким образом мощность P индукционного нагрева определяется по формуле $P = P_1 + P_2$, где P_1 - мощность, выделяемая в диске за счет частоты тока, пропорциональна квадратному корню частоты тока, P_2 - мощность, выделяемая в диске за счет вращения, пропорциональна экспоненциальной зависимости частоты вращения.

В данной работе впервые рассмотрен нагрев дисков, вращающихся в переменном электромагнитном поле, с учетом дополнительного выделения мощности внутренних источников на высоких частотах вращения.

При расчете параметров электромагнитного поля задаются свойства среды. Система уравнений Максвелла, представляет собой модель электромагнитного процесса. Эта модель лежит в основе как аналитических, так и численных методов расчета электромагнитных полей.

В математической модели системы диск-индуктор конечно-элементное решение электромагнитной задачи осуществляется с использованием формулировки магнитного векторного потенциала в программном комплексе ANSYS. Данная формулировка является узловой, она позволяет проводить анализ статических, гармонических и переходных задач и имеет три основные степени свободы. Ее преимуществом является возможность использования уравнений связи для интеграции двух разных сеток, несвязанных между собой (в частности для моделирования вращения).

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРЖНЕВЫХ ИНДУКТОРОВ

Все задачи, так или иначе связанные с индукционным нагревом, являются междисциплинарными, то есть для того, чтобы определить тепловое поле в изделии, необходимо сначала решить электромагнитную задачу и найти внутренние источники теплоты в изделии. А затем уже на основе найденных внутренних источников теплоты определить распределение температурного поля в диске в заданный момент времени. Программный комплекс ANSYS позволяет решать связанные электромагнитные-

тепловые задачи.

Для уменьшения времени расчета, построение сетки конечных элементов проводилось с учетом глубины проникновения электромагнитной волны в материал, т.е. ближе к поверхности объекта сетка была более густая, по сравнению с центром. Построенная конечно-элементная сетка системы «индуктор-диск» содержит примерно 70000-150000 элементов. Геометрия указанной математической модели представлена на рис. 1 и 2.

Для электромагнитного расчета гармонической задачи в программном комплексе ANSYS использован трехмерный элемент SOLID97 (узловая постановка задачи).

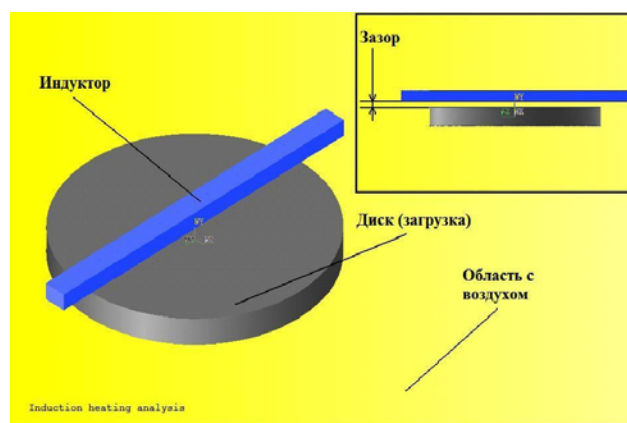


Рис. 1. Геометрическая модель системы «индуктор-диск»

Другими словами использована форма элемента шестигранник («кирпич»). На внешних границах области воздуха было задано нулевое значение векторного магнитного потенциала, то есть предполагается, что на внешней границе модели, удаленной от источников, происходит полное затухание электромагнитного поля.

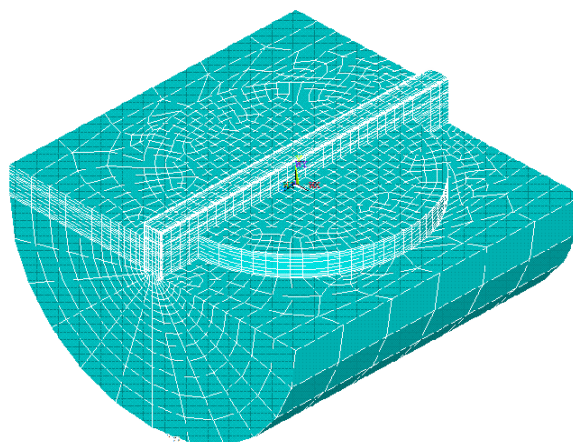


Рис. 2. Сетка конечных элементов системы «индуктор-диск» вместе с объемом воздуха (верхняя часть объема воздуха не представлена)

На всех участках внешней границы, где явно не указаны иные виды граничных условий, задано условие Неймана.

Исследования электрических и энергетических характеристик с применением стержневых индукторов проводились в системе индуктор-диск. Были проведены расчетные исследования влияния зазора между индуктором и диском и частоты тока на основные электрические параметры стержневых индукторов: КПД и $\cos\varphi$. расчеты производились на частотах $f = 0,05 \div 8,00$ кГц. при этом использовались различные значения зазора между индуктором и диском $5 \div 15$ мм. ток индуктора 500 А. На рис. 3 изображены расчетные зависимости электрического КПД и $\cos\varphi$ от частоты тока индуктора при зазорах: 5, 10 и 15 мм (соответственно кривые 1, 2, 3).

Из графиков (рис. 3) видно, что при повышении частоты тока КПД увеличивается, а затем остается примерно постоянным. Таким образом, можно сделать вывод о неэффективности использования низких частот (0,05 – 1,00 кГц).

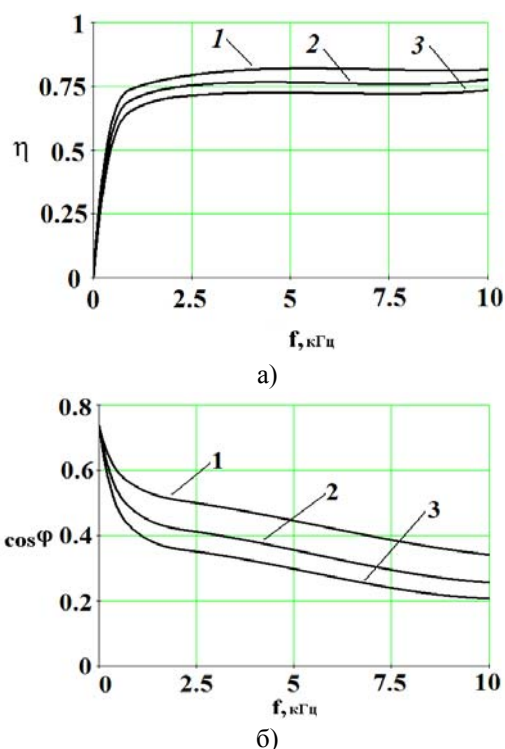


Рис. 3. Зависимости КПД (а) и $\cos\varphi$ (б) от частоты при разных зазорах 5, 10 и 15 мм (соответственно кривые 1, 2 и 3).

Перед разгонными испытаниями дисков необходимо получить заданное температурное поле по радиусу диска и обеспечить равномерное распределение температур по окружностям каждого радиуса при вращении, как, например, показано на рис 4. Для получения заданного температурного распределения перед испытаниями используется небольшая частота вращения, порядка 1-10 об/с, нижний диапазон которой

ограничивается минимальной частотой вращения электропривода, который приводит диск во вращение.

При малой частоте вращения диска существует вероятность получения неравномерного распределения температуры по окружности диска, так как при достаточно большой теплопроводности материала (например, алюминия) скорость распространения тепла по диску будет превышать скорость вращения, что вызовет неравномерности распределения температур по окружностям диска (рис. 5), напоминающие эллипсы. Указанное физическое явление обусловлено стоком тепловых потоков в более холодные зоны.

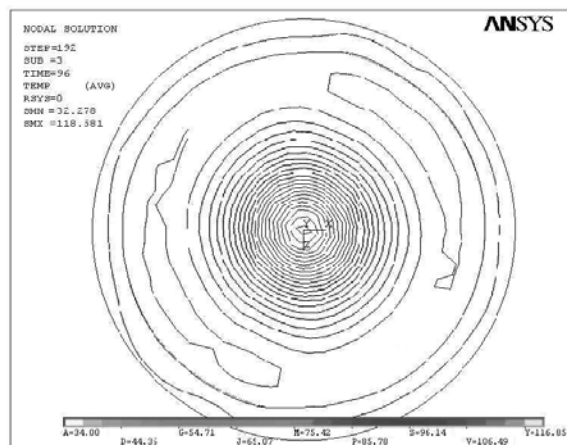


Рис. 4. Пример равномерного распределения температур по окружности поверхности диска.

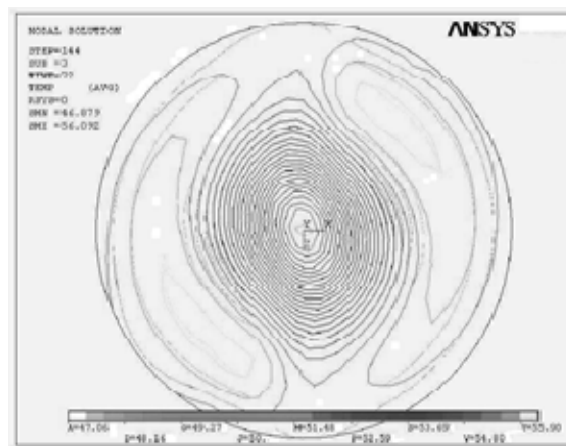


Рис. 5. Пример неравномерного распределения температур по окружности поверхности диска.

Поэтому важно определить диапазон частот вращения диска, при котором окружная температурная равномерность сохраняется.

Распределение температуры по окружности считается равномерным, если неравномерность температуры по окружностям на любом радиусе диске не превышает одного процента от максимального значения температуры в диске.

Очевидно, что минимальная частота вращения, при которой сохраняется равномерность по окружности

диска, в первую очередь зависит от свойств материала диска. Диски, которые испытываются на разгонном стенде, выполнены из никелевого сплава. Данный материал является немагнитным и имеет достаточно низкую теплопроводность. Поскольку на испытательном стенде используются частоты вращения 1-10 об/с для отладки температурного поля диска, имеет смысл для расчета выбрать частоту вращения ниже этого диапазона, например, 0,1 об/с и несколько частот вращения, входящих в указанный диапазон: 1 об/с и 8 об/с. Произведем расчет и анализ системы при выбранных частотах вращения диска. При частоте вращения 0,1 об/с для никелевого сплава после первого оборота распределение температур по поверхности диска является практически равномерным, поскольку при вращении тепло не успевает распространиться по поверхности диска за счет достаточно низкой теплопроводности.

Увеличив частоту вращения до 1 об/с для никелевого сплава распределение температуры на поверхности диска практически не меняется, то есть равномерность по окружности сохраняется. При дальнейшем повышении частоты вращения диска до 8 об/с (время нагрева – 0,1 с) после одного оборота в температурном поле уже появляются небольшие неравномерности (рис. 6), связанные с меньшим в несколько раз временем нагрева за одинаковое количество оборотов по сравнению с частотой вращения 0,1 об/с и 1 об/с. На рис. 6 видно, что в температурном поле присутствуют указанные неравномерности температуры, связанные с текущим положением диска относительно индуктора. Похожее явление присутствовало и на частоте вращения 1 об/с (время нагрева - 1 с), но были не так сильно выражены из-за большего времени нагрева. Как будет дальше показано, эти небольшие неравномерности температурного поля носят временный характер и при дальнейшем нагреве устраняются.

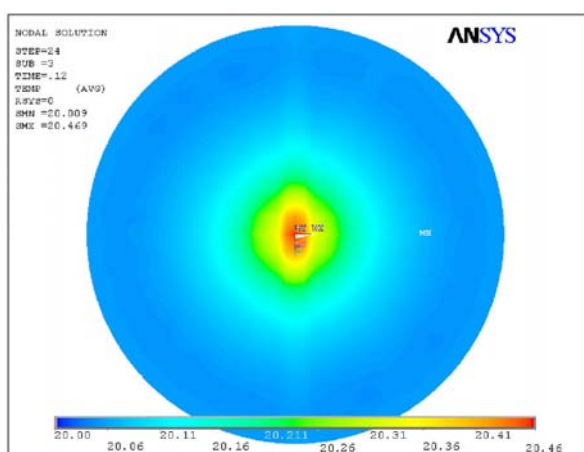


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности диска при частоте вращения 8 об/с после одного оборота (никелевый сплав).

Теперь сравним распределения температурного поля диска после одного оборота и после нескольких

оборотов для никелевого сплава. После 4-х оборотов для всех скоростей вращения распределение температуры по окружностям диска равномерно.

Можно предположить, что при дальнейшем нагреве диска не будет существенных изменений в распределении температур по окружностям диска. При этом указанная окружная равномерность температуры будет улучшаться при продолжении нагрева.

Проанализируем количественные характеристики равномерности теплового поля, то есть зависимости неравномерности температур в % относительно максимального значения температуры после одного, четырех и шести оборотов для никелевого сплава. После одного оборота неравномерность температурного поля более всего заметна и допустимому значению неравномерности в 1 % соответствует только частота вращения 1 об/с.

После четырех и шести оборотов для никелевого сплава проявляется общая тенденция к снижению окружной неравномерности и после шести оборотов указанная неравномерность при всех частотах вращения уже не превышает допустимого значения в 1%, то есть температурное поле по окружностям диска полностью равномерно. Время, за которое достигается равномерность распределения температуры по окружности диска для частот вращения 0,1, 1 и 8 об/с (рис. 7) соответственно равно 60, 6 и 0,75 с. Можно сделать вывод, что окружная равномерность быстрее всего достигается для частоты вращения 8 об/с время нагрева составляет 0,75 с, а медленнее всего для 0,1 об/с (время нагрева - 60 с).

На частотах вращения 0,1, 1 и 8 об/с распределения температур диска более равномерны после шести оборотов. Из анализа рис. 7 видно, что распределение температуры более равномерно по сравнению с рис. 6.

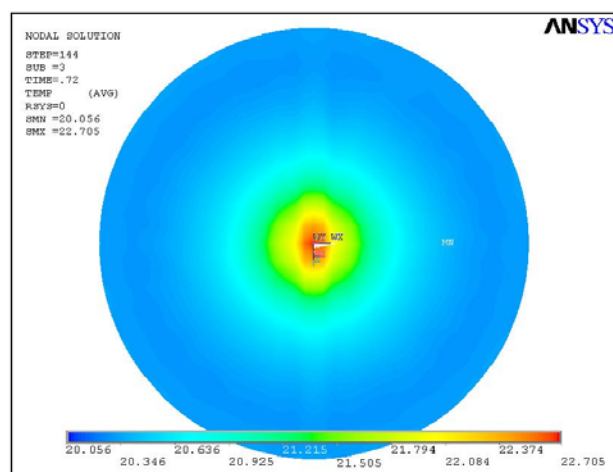


Рис. 7. Распределение температуры при частоте вращения диска 8 об/с после шести оборотов (никелевый сплав).

Проанализировав результаты расчетов для никелевого сплава можно сделать вывод, что применяемый на стенде диапазон частот вращения для нагрева диска перед испытаниями обеспечивает

полностью равномерное распределение температур по окружностям диска и позволяет получить заданное неравномерное температурное поле по радиусу диска.

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ ТУРБИН ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ ИНДУКТОРОВ

Проведены расчеты индукционного нагрева дисков турбин ГТД с вращением и без вращения. При увеличении частоты вращения n увеличивается скорость изменения магнитного потока в диске и наведенная ЭДС. В результате мощность внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска (см. кривая 2 на рис. 8). Результаты расчетов мощности, выделяющейся в диске из никелевого сплава при индукционном нагреве с учетом вращения диска приведены на рис. 8. Параметры режима: ток – 500 А, частота – 2400 Гц, зазор – 10 мм. Также на рис. 4 представлена зависимость мощности I , выделяемой в диске без вращения. Значение $P = 100\%$ соответствует мощности, выделяемой в неподвижном диске – 30 кВт.

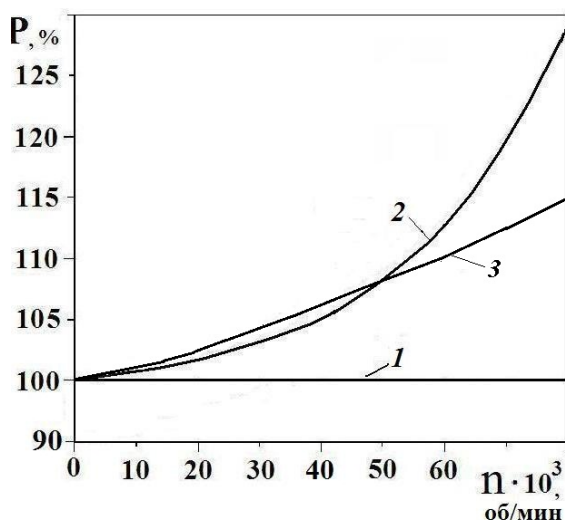


Рис. 8. Зависимость выделяемой мощности в диске от частоты вращения: 1 – без вращения, 2 – с учетом вращения (стержневой индуктор), 3 – с учетом вращения (эллипсный индуктор).

Из рис. 8 следует, что влияние наведенных за счет вращения диска токов, т.е. увеличение мощности внутренних источников теплоты становится существенным при частотах вращения выше 15000-20000 об/мин. Это является дополнительным фактором энергосбережения при проведении термоциклических испытаний дисков с использованием индукционного нагрева.

На основе разработанных моделей в комплексе ANSYS приводятся результаты расчетных исследований по моделированию с использованием разных индукторов распределений температур во вращающихся плоских дисках.

В соответствии с методикой трехмерного расчета индукционного нагрева созданы конечно-элементные модели диска и индуктора с учетом постоянного зазора между индуктором и поверхностью диска.

При вращении наиболее эффективный нагрев достигается в тех кольцевых зонах диска, которые более длительное время находятся под участками индуктора. Следовательно, каждый такой участок индуктора характеризуется отношением его ширины к соответствующей кольцевой зоне нагрева. В данном случае ширина такого участка индуктора сложной формы определяется на основе его пересечения соответствующей кольцевой зоной нагрева.

Указанные факторы учитывались в расчетных исследованиях распределений температур во вращающемся диске с использованием двух эллипсных индукторов, расположенных с двух его сторон (рис. 9).

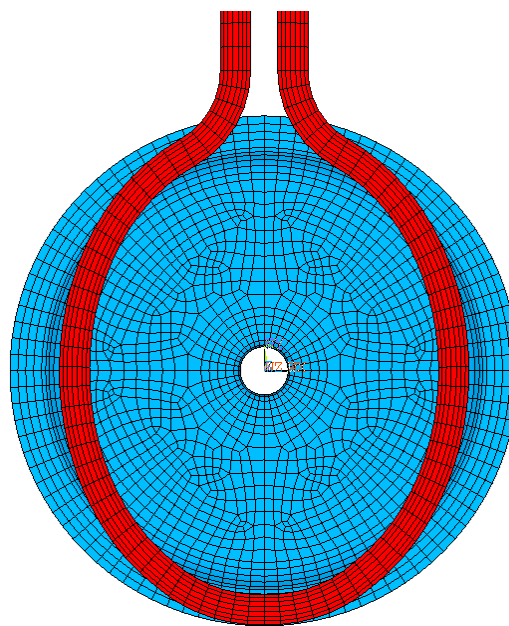


Рис. 9. Эллипсный индуктор.

Так как указанная задача индукционного нагрева диска является многодисциплинарной, то для того, чтобы определить температурное поле, необходимо сначала решить электромагнитную задачу и найти внутренние источники теплоты в диске. А затем уже на основе найденных внутренних источников теплоты определить распределение теплового поля в диске.

Для решения задачи созданы две независимые электромагнитная и тепловая модели с одинаковой геометрией. Для моделирования температурного поля использовался элемент SOLID90. Алгоритм решения связанной задачи осуществлялся с помощью ANSYS Multi-field Solver.

С использованием эллипсных индукторов (рис. 9), расположенных эквидистантно относительно поверхности диска с двух его сторон, были проведены расчетные исследования по моделированию неравномерного распределения температуры по радиусу диска постоянной толщины.

Индукционный нагрев диска осуществлялся до максимальной заданной температуры 550°C. Для всех индукторов ток был одинаковый - 500 А, частота тока 2400 Гц.

В результате решения электромагнитной задачи получены без вращения распределение внутренних источников тепла (рис. 10) и зависимость выделяемой мощности в диске от частоты вращения (кривая 3, рис. 8). До 50000 об/мин эллипсный индуктор более эффективен, чем стержневой индуктор.

После решения тепловой задачи определено распределение температуры (рис. 11, 12) в диске с учетом вращения в переменном электромагнитном поле.

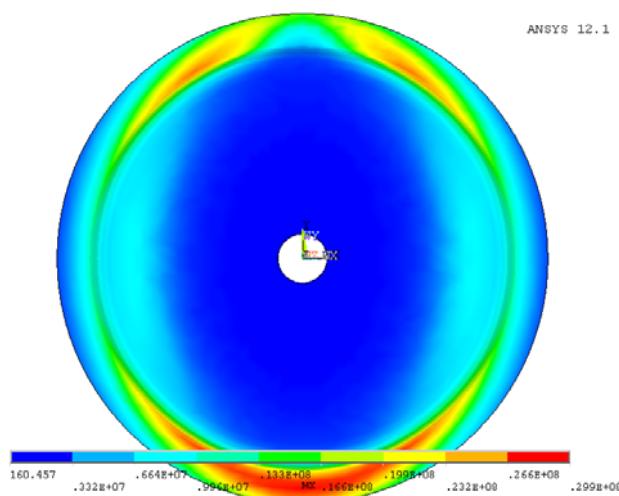


Рис. 10. Распределение удельной мощности нагрева в неподвижном диске.

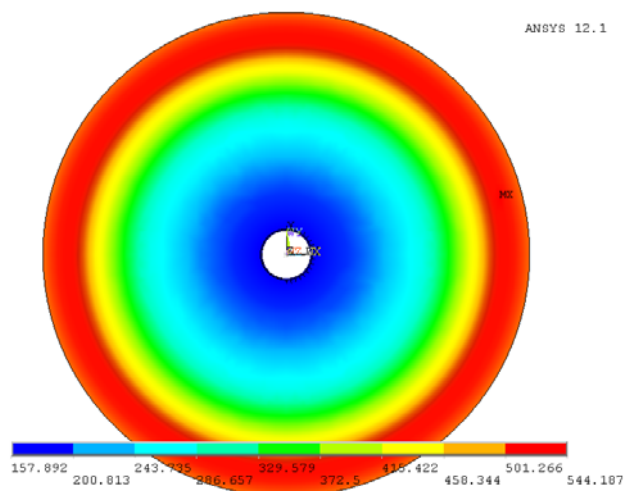


Рис. 11. Распределение температуры во вращающемся диске.

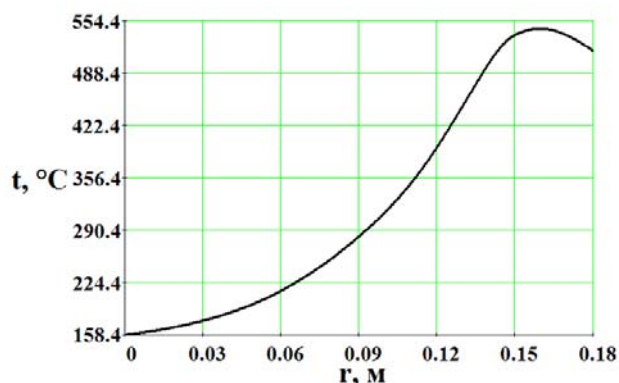


Рис. 12. Распределение температуры по радиусу вращающегося диска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конечно-элементные трехмерные модели для расчета электромагнитных и температурных полей параметров индукторов при нагреве вращающихся дисков в программном комплексе ANSYS.

Рассмотрены особенности математического моделирования индукционного нагрева вращающихся дисков турбин ГТД.

Получены результаты исследований энергетических характеристик стержневых индукторов с учетом влияния зазора и частоты тока при нагреве дисков.

Представлены и проанализированы результаты исследований влияния частоты вращения на равномерность нагрева кольцевых зон вращающегося диска при получении неравномерного распределения температуры по его радиусу.

Получены результаты исследований эффекта при индукционном нагреве дисков, заключающийся в дополнительном выделении тепловой энергии в изделии за счет вращения. Проанализировано влияние частоты вращения на выделение мощности внутренних источников тепла во вращающемся диске с использованием разных индукторов.

Приведены результаты расчетных исследований распределений температур во вращающихся дисках с использованием стержневых и эллипсных индукторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: Монография. — Новосибирск: Изд.-во НГТУ, 2006. — 286 с. — (Серия «Современные электротехнологии»).
2. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Метод испытаний дисков турбомашин и бандажей роторов турбогенераторов с использованием индукционного нагрева // Электричество. 2009. № 7. — С. 33-38.
3. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростной индукционный нагрев. Электротехническая энциклопедия: в 4 т. / под редакцией А.Ф. Дьякова (гл. ред.). Т. 3. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — С. 175.